

## 혹한·혹서 피해 저감용 PCM 혼입콘크리트의 내구성에 관한 연구

## A Study on the Durability of PCM Mixed Concrete for the Reduction of Cold and Hot Damage

김호열<sup>1</sup> · 장일영<sup>2\*</sup>Hoyeol Kim<sup>1</sup>, Il Young Jang<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Doctor's Course, Department of Civil Engineering, Kumoh national Institute of Technology, Gumi, Republic of Korea<sup>2</sup>Professor, Department of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology, Gumi, Republic of Korea

\*Corresponding author: Il Young Jang, jbond@kumoh.ac.kr

## ABSTRACT

**Purpose:** In this study, PCM was used to give thermal performance to concrete and analyze its effect on durability to prevent disasters that may occur in concrete when exposed to hot and cold environments. **Method:** After preparing concrete specimens containing 10, 30, and 50% of the two types of PCMs compared to the cement volume, the pore volume, freeze melting resistance, and scaling resistance were evaluated. **Result:** Regardless of the type, when PCM powder was mixed with concrete, the amount of pores decreased, and when 10% and 30% were mixed, the freeze-melting resistance was also improved. It was also confirmed that the higher the mixing amount, the better the scaling resistance. **Conclusion:** When mixing powdered PCM into concrete, it is believed that durability can be improved to a certain level by the filling effect, and additional various studies should be supported for actual field application.

**Keywords:** Concrete, Phase change material, Freeze-thaw, Concrete peeling, Porosimeter

## 요약

**연구목적:** 본 연구에서는 혹서 및 혹한 환경에 노출 콘크리트에서 발생할 수 있는 재난을 방지하기 위해 PCM을 활용해 콘크리트에 열성능을 부여하고 내구성에 미치는 영향을 분석하였다. **연구방법:** 두 종류의 PCM을 시멘트 부피대비 10, 30, 50% 혼입한 콘크리트를 제작한 후 공극량, 동결융해 저항성, 스케일링 저항성을 평가하였다. **연구결과:** 종류에 상관없이 PCM 분말을 콘크리트에 혼입할 경우 공극량이 감소되는 것으로 나타났고 10%, 30% 혼입시 동결융해 저항성 또한 향상되는 것으로 나타났다. 또한 혼입량이 높아질수록 스케일링 저항성이 향상되는 것을 확인하였다. **결론:** 분말형태의 PCM을 콘크리트에 혼입 시 일정수준까지는 채움효과에 의해 내구성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며 실제 현장 적용을 위해서는 추가적으로 다양한 연구가 뒷받침 되어야 할 것으로 사료된다.

**핵심용어:** 콘크리트, 상변화재료, 동결융해, 콘크리트박리, 수은압입법

Received | 8 April, 2024

Revised | 25 April, 2024

Accepted | 3 May, 2024

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

콘크리트는 높은 강도와 내구성, 다목적성, 경제성, 환경 친화성 등 다양한 이점 때문에 가장 많이 사용되는 건설재료로 자리 잡고 있다. 강도가 높고 오랜 기간 동안 지속적으로 사용할 수 있는 특성은 건축물과 인프라 구조물에 안정성을 제공하지만 다양한 재료가 혼합되고 내부에 공극이 존재하는 다공성 복합재료인 이유로 아직까지 명확하게 밝혀지지 않은 물리·화학적 특징들이 존재한다. 더욱이, 콘크리트는 다양한 구조물에 적용되어 각기 다른 용도로 사용되며 다양한 화학적, 물리적 환경에 노출되기 때문에 예상하지 못한 사고와 재난을 겪는 경우가 빈번하게 발생한다(Forty, 2013; Cabeza et al., 2007). 본 논문에서는 혹서·혹한 환경에서의 콘크리트에서 발행할 수 있는 다양한 피해를 저감시키기 위해 상변화물질(Phase change material; PCM)을 잔골재에 치환하여 적용 하였으며 PCM이 콘크리트에 미치는 영향을 분석하였다.

PCM은 굉장히 다양한 물질이 있으며 주로 액체-기체 사이에서 발생하는 상변화 에너지를 이용하는 경우가 많다. 우리에게 친숙한 물 역시 대표적인 상변화 물질 중 하나이며 이해를 돕기 위해 Fig. 1에 물의 상변화 과정 중에 발생하는 열 출입을 나타냈다. 고체에서 온도가 상승하여 녹는점에 도달하면 액체로 되는 과정에서 온도변화 없이 다량의 에너지를 흡수하게 되며 액체의 온도가 다시 하락하여 어는점에 도달하게 되면 온도변화 없이 다량의 에너지를 방출하게 된다. 상변화 과정에서 출입하는 에너지의 양은 고체나 액체상태의 물질이 동일한 온도를 올리거나 내릴 때 필요한 양보다 상당히 큰 값을 가진다(Shen et al., 2021; Cheng et al., 2013).

PCM 상변화과정 중에 다량의 에너지가 흡수 및 방출되는 특성을 콘크리트에 적용하기 위해 다음과 같은 특징을 가지는 PCM을 선택하여 사용하였다. 콘크리트와의 화학적 안정성이 뛰어나 반응하지 않고 본래의 성질을 유지할 수 있고 충분한 잠열량을 확보 가능해야 하므로 파라핀계열을 선택했다(Cheng et al., 2013). 또한 혹한 및 혹서환경에서 콘크리트에 열성능을 부여하기 위해 상변화 온도 4.5°C, 44°C PCM 물질을 사용했으며, 액체 상태에서 콘크리트 외부로 유출되지 않아야 하므로 Fig. 2와 같이 캡슐화 하였다. 캡슐화 된 PCM을 콘크리트 배합단계에서 혼입하였으며 경화된 콘크리트를 대상으로 공극량, 동결융해 저항성, 스케일링 저항성을 평가하였다.

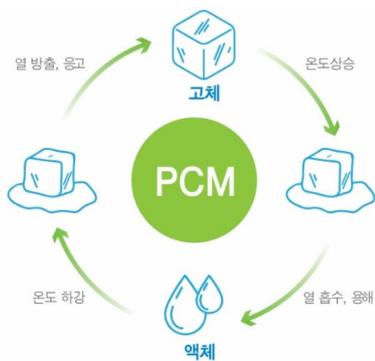


Fig. 1. The entry and exit of heat during the phase change process

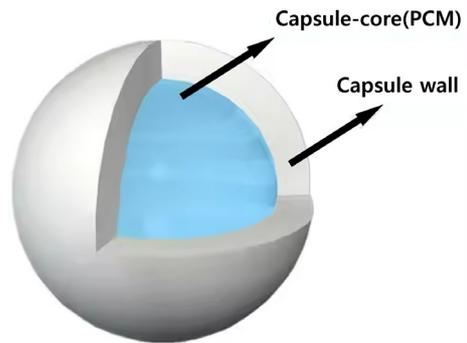


Fig. 2. Structure of PCM Capsules

## 실험계획 및 방법

### 사용재료

#### 상변화물질

상변화물질은 앞에서 밝힌 바와 같이 파라핀 계열의 상변화 온도 4.5°C, 44°C의 성질을 가지고 있으며 누출을 막기 위해 캡슐화한 것을 사용하였으며 평균입경은 약 12 $\mu$ m 정도의 분말 형태이다. 그 외의 다른 특징은 Table 1과 같다.

**Table 1.** Physicochemical properties of PCM

분자식	분자량	상변화온도	잠열량	순도	계열	비중	캡슐물질
CH <sub>3</sub> -(CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> -CH <sub>3</sub>	198g/mol	4.5°C	>210kJ/kg	>97% 이상	Paraffin	0.85	Melamine
CH <sub>3</sub> -(CH <sub>2</sub> ) <sub>20</sub> -CH <sub>3</sub>	310g/mol	44°C	>220kJ/kg	>95% 이상	Paraffin	0.99	Melamine

#### 시멘트

배합에 사용된 시멘트는 국내 S사의 제품을 사용했으며, KS L 5201 규격을 만족하는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement; OPC)로 Table 2와 같이 CaO 70.0%, SiO<sub>2</sub> 15.6%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4.4%를 함유하고 있으며 비중 3.17g/cm<sup>3</sup>, 분말도 3,610cm<sup>2</sup>/g, 평균 입경 7.87 $\mu$ m를 가진다.

**Table 2.** Physicochemical properties of OPC

Oxides (%)							
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SrO	CaO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
4.37	2.69	3.40	15.60	0.10	70.00	1.71	1.45
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )		Fineness (cm <sup>2</sup> /g)			Average diameter ( $\mu$ m)		
7.17		3,610			7.87		

#### 골재

배합에 사용된 잔골재와 굵은 골재는 경북지역에서 채취한 강사 및 쇄석을 이용하였고 Table 3와 같은 비중, 흡수율, 최대치수(G<sub>max</sub>)를 가진다.

**Table 3.** Physical properties of aggregates

잔골재	비중	2.60
	흡수율	1.05
굵은 골재	비중	2.65
	흡수율	0.90
	최대치수 (G <sub>max</sub> , mm)	25

## 배합설계

PCM 상변화온도 및 혼입률에 따른 공극률 및 내구성 특성을 파악하기 위해 Table 4와 같이 콘크리트 배합설계를 결정하였다. 2종류의 PCM은 PCM 부피대비 10%~50%로 하였으며 배합명은 PCM 상변화 온도\_치환율로 하였다. 배합설계의 부피를 동일하게 유지시키기 위해 PCM이 혼입된 부피만큼의 잔골재 부피를 감소시켰다. 2종류의 PCM은 비중이 다르기 때문에 동일한 치환율에도 감소되는 잔골재의 양은 차이가 발생한다.

**Table 4.** PCM concrete mixing design

Sample name	OPC	Mix design (kg/m <sup>3</sup> )				
		PCM		Water	Gravel	Sand
		4.5°C	44°C			
Control	343.14	-	-	137.26	1087.75	840.68
4.5_10%	343.14	9.26	-	137.26	1087.75	812.35
4.5_30%	343.14	27.78	-	137.26	1087.75	755.71
4.5_50%	343.14	46.30	-	137.26	1087.75	699.06
44_10%	343.14	-	10.78	137.26	1087.75	812.35
44_30%	343.14	-	32.35	137.26	1087.75	755.71
44_50%	343.14	-	53.92	137.26	1087.75	699.06

## 실험방법

### 공극률 실험방법

PCM 콘크리트의 공극률을 평가하기 위해 수은압입법 (Mercury intrusion porosimetry; MIP)을 활용하였다. 콘크리트는 앞서 밝힌 배합설계와 동일하게 혼합되었으며 100mm \* 100mm \* 100mm의 크기를 가지는 정육면체 몰드에 타설되어 24시간 기건양생 이후 20°C±2°C의 수중에서 27일간 양생을 진행하였다. 이후 파쇄하여 약 5mm 크기의 모르타르 부분을 확보하여 수화 정지를 위해 에탄올에 침지하였다. MIP는 수은 침투를 이용한 기공률 측정방법으로써 미세한 공극에 수은이 압력에 의해 침투되는 양을 측정해 공극의 크기 및 분포를 계산한다. 측정결과는 압력의 세기에 따라 침투되는 수은의 누적부피의 함수로써 나타내고 임의의 압력에서 침투된 원형 기공의 직경은 식(1)에 표현된 Washburn식에 의해 계산된다(EM Tang et al., 2016). 식(1)에서 R은 기공반경,  $\sigma$ 는 수은주의 표면장력,  $\theta$ 는 접촉각, P는 압력을 나타낸다.

$$R = \frac{2\sigma \cos\theta}{P} \quad (1)$$

### 동결융해 실험방법

PCM 콘크리트의 동결융해 저항성을 평가하기 위해 KS F 2456(급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법)을 참고하여 실험을 실시하였다. 100mm\*100mm\*400mm 크기를 가지는 몰드에 타설하였으며 24시간 이후에 탈형하여 수중에서 91일간 양생을 실시하였다. 이후 -18°C ~4°C의 온도변화를 1cycle로 하여 총 300cycle 동안 동결융해 사이클을 적용하였

으며 매 100cycle마다 동탄성 계수를 측정하였다. 동탄성계수는 측정 장비를 통해 확보한 콘크리트 공명진동수(Hz)를 식(2)에 대입하여 계산되며  $P_c$ 는 상대동탄성계수(%),  $n_0$ 는 동결융해를 적용하지 않은 시편의 1차 공명진동수(Hz),  $n_c$ 는 해당 cycle에서의 1차 공명진동수를 의미한다.

$$P_c = \left( \frac{n_c^2}{n_0^2} \right) \times 100 \quad (2)$$

### 스케일링 저항성 실험방법

PCM 콘크리트의 염화물 수용액 노출 상태에서 동결융해에 의한 콘크리트의 박리정도를 측정하기 위해 ASTM C 672 (Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals)에 의한 스케일링 테스트를 진행하였다. 시험체는 Fig. 3과 같은 몰드에 콘크리트를 타설한 후에 24시간 동안 기건 양생을 진행하고, 28일간 수중양생을 실시하였다 완성된 시험체의 모습은 Fig. 4과 같다. 제작된 시험체 표면에 4% 농도의 CaCl<sub>2</sub> 용액 500ml를 표면에 적용하고 온도조절이 가능한 챔버에 거치한 뒤 -15°C에서 18시간, 23°C에서 8시간을 1cycle로 하여 총 50cycle 동안 시험을 진행하며 매 10cycle마다 용액을 교체해 주었다. 10cycle, 20cycle, 50cycle에 시험체의 무게를 측정하여 박리되는 콘크리트의 양을 측정하였다.



Fig. 3. Mold for scaling test



Fig. 4. Scaling test specimen

## 실험결과 및 고찰

### 공극량

MIP 실험에 의한 PCM 콘크리트의 공극률 측정 결과를 Table 5에 나타냈다. OPC와 PCM 콘크리트는 약 15-10%의 공극률을 가지는 것을 확인할 수 있고, PCM분말을 혼입한 콘크리트의 경우 OPC 콘크리트에 비해 낮은 공극률 값을 가지는 것으로 나타났다. OPC 공극률 대비 가장 낮은 공극률 감소를 나타낸 배합은 4.5\_10%로 14.1%였으며 가장 큰 공극률 감소를 나타낸 배합은 4.5\_50%로 10.1%의 공극률을 나타냈다.

PCM을 혼입한 배합에서 혼입률이 10%에서 30%로 증가할 때 가장 높은 공극률 감소를 나타냈으며 혼입률이 30%에서 50%로 증가할 때는 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 확인되었다. PCM의 상변화 온도에 따른 공극률차이는 크지 않았지만 10%를 제외한 배합에서는 상변화 온도 4.5°C PCM이 더 낮은 공극률 값을 가지는 것으로 나타났다.

PCM 혼입 유무와 혼입률에 따라서 공극량 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었는데 이는 마이크로 단위의 직경을 가지는 PCM 분말이 콘크리트 내부에 생성된 비교적 큰 공극을 채워 총 공극량을 낮춘 것으로 판단되며, 또한 PCM 혼입에 의해 증가하는 부피를 잔골재 부피감소를 통해 보상해줬으므로 그에 따른 실적률 증가로 인해 공극률이 낮아진 것으로 판단된다 (Meshgin et al., 2013; Thiele et al., 2015).

**Table 5.** Pollution measurement results

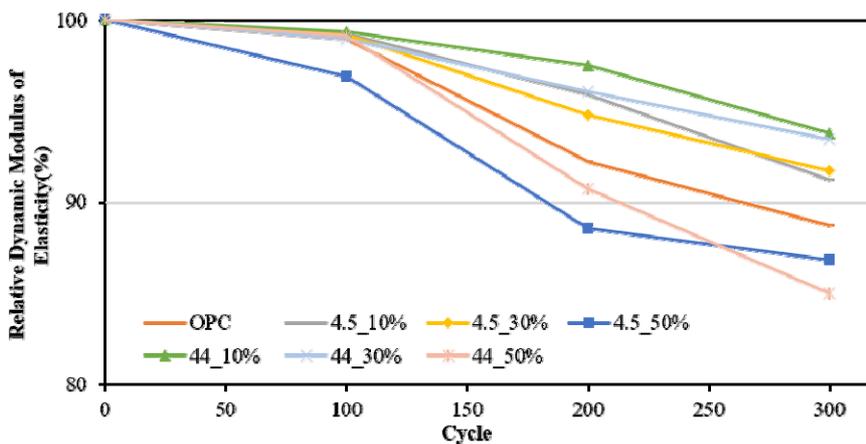
Porosity (%)						
OPC	4.5_10%	4.5_30%	4.5_50%	44_10%	44_30%	44_50%
15.5	14.1	11.1	10.1	13.9	11.5	10.3

### 동결융해

KS F 2456 (급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)에 의한 총 300cycle에 해당하는 시험 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 모든 배합에서 동결융해 사이클 반복 횟수가 증가함에 따라 상대동탄성계수가 감소하는 경향을 나타냈고 200cycle에서 가장 큰 폭의 상대동탄성계수 감소폭이 나타났다. 100cycle의 동탄성계수는 대부분 유사하게 나타났지만 4.5\_50%의 경우 다른 배합과 달리 큰 폭의 상대동탄성계수가 감소하는 경향을 나타냈다.

PCM이 10%, 30% 혼입된 배합의 경우 OPC에 비해 낮은 상대동탄성계수 감소율을 나타냈지만 50% 혼입률을 가지는 배합의 경우 OPC 보다 높은 상대동탄성계수 감소율을 나타냈다. 두 종류의 PCM 각각의 300Cycle 결과에서 10%, 30% 혼입률간의 상대동탄성 계수 차이는 크지 않았지만 50%에서 급격히 상대동탄성계수가 감소하는 것으로 확인되었다. 대부분의 경우에서 상변화온도 44°C의 PCM이 혼입된 시편이 동일 혼입률 조건에서 4.5°CPCM에 비해 높은 상대동탄성계수를 나타냈지만 300 cycle의 결과에서는 4.5°C PCM이 더 높은 상대동탄성계수를 나타내는 것으로 나타났다.

일반적인 콘크리트에서 일정 수준의 공극은 수분의 동결에 의해 발생하는 팽창압을 완충하여 동결융해 저항성을 향상시켜 준다고 알려져 있다. 하지만 본 연구에서는 PCM 10%, 30% 가 혼입되어 공극률이 낮아진 상황에서 더욱 높은 동결융해 저항성을 가지는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 PCM 혼입에 의한 공극채움 효과가 동결융해 과정에서 추가적인 수분 침투를



**Fig. 5.** Relative dynamic elasticity coefficient measurement results

저해했기 때문으로 추정되며 50% 혼입률에서는 10%와 30%와 유사하게 수분의 침투를 저해했을 것으로 판단되나 공극량 부족과 압축강도 저하로 인해 팽창압을 견디지 못하고 콘크리트 내부에 다량의 미세균열이 발생했을 것으로 판단된다.

### 스케일링저항성

ASTM C 672(Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals)에 준하는 스케일링 저항성 시험에 의한 중량감소량을 Fig. 6에 나타냈다. 그림에 따르면 테스트 cycle이 증가할수록 중량감소량 또한 증가하는 것으로 나타났다. OPC가 0.52kg/m<sup>2</sup>으로 중량감소량이 가장 높았고 4.5\_50%배합이 0.25kg/m<sup>2</sup>으로 가장 낮은 중량 감소량을 보여주었다. 모든 배합에서 초기 cycle에서의 중량감소량이 크지 않지만 cycle이 증가함에 따라 급격히 중량감소량이 증가하는 것으로 나타났다. OPC는 PCM혼입 콘크리트에 비해 항상 높은 중량감소를 나타내는 것으로 확인 되었으며 PCM 콘크리트는 중량감소가 발생하지 않는 10cycle에서도 중량감소가 발생하였다.

PCM의 혼입량이 커질수록 박리량이 감소하였으며, 4.5°CPCM의 경우 혼입률 10, 30, 50%일 때 50cycle에서의 중량감소량은 0.31, 0.12, 0.05kg/m<sup>2</sup>, 44°CPCM의 경우 0.38, 0.21, 0.11kg/m<sup>2</sup>으로 나타났다. 4.5°CPCM이 44°CPCM보다 모든 혼입률에서 높은 스케일링 저항성을 나타냈으며 혼입률 10, 30, 50%일 때 23, 75, 120% 낮은 중량감소량을 보였다.

PCM의 종류에 상관없이 PCM혼입한 경우에 스케일링 저항성이 향상되는 것을 확인할 수 있었으며 이는 앞서 밝힌 동결융해 시험결과와 유사하다. 하지만 50%혼입에서 OPC 보다 낮은 동결융해 저항성을 나타낸 것과 달리 혼입량이 증가할수록 스케일링 저항성이 향상되었다. 또한 4.5°CPCM이 44°CPCM에 비해 동일 혼입률에서 낮은 박리량을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 결과는 스케일링 테스트와 동결융해 시험의 조건차이에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 동결융해 시험의 경우 -18°C ~ 4°C 구간에서 진행되지만, 스케일링 테스트의 경우 -15°C ~ 23°C 구간에서 진행된다. 비교적 낮은 온도구간에서 진행되는 동결융해 시험의 경우 PCM이 상변화에 의한 열에너지를 축적시간이 상대적으로 짧으므로 콘크리트의 온도가 더욱 급격하게 떨어져 수분이 냉각되어 얼음을 형성하기에 좋은 조건이 갖춰지기 때문인 것으로 사료된다.

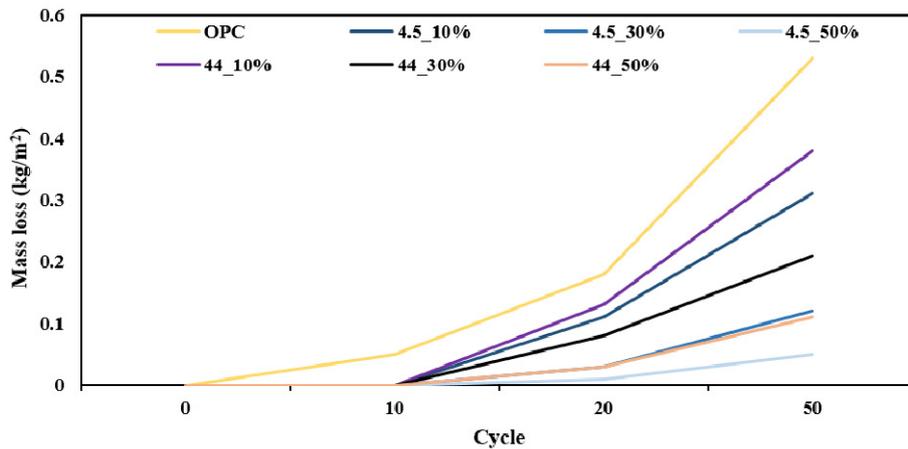


Fig. 6. Scaling test results

## 결론

본 논문에서는 혹서 및 혹한환경에서의 콘크리트 구조물의 재난을 예방하기 위한 목적으로 2종류의 상변환물질(PCM)을 각각 콘크리트에 혼입하였고 혼입에 따른 공극률 변화 및 동결융해 과정에서의 내구성 변화를 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MIP 실험 결과에 따르면 PCM 콘크리트는 OPC 보다 낮은 공극률을 가졌다. PCM 혼입률이 10%에서 30%로 증가할 때 공극률이 2.7% 감소하였으며 30%에서 50%로 증가 할 때는 큰 차이를 나타내지 않았다. 또한, PCM의 상변화 온도는 공극률에 큰 영향을 미치지 않았지만, 일부 경우 4.5°CPCM이 낮은 공극률을 보였다. PCM의 혼입은 콘크리트 내부의 큰 공극을 채워 공극률을 감소시키며 이는 PCM이 콘크리트의 열적 성능을 향상시키고 구조적 특성을 개선할 수 있음을 시사한다.
- (2) 캡슐 형태의 PCM 혼입은 콘크리트의 열성능 부여 외에도 내구성 향상에 기여할 것으로 판단된다. 하지만 동결융해에 대한 내구성은 일정 수준 이하의 PCM 혼입률에서만 일반콘크리트에 비해 효과적인 것으로 나타났으며 표면 박리에 의한 내구성 손실은 해당연구의 혼입률 범위에서는 혼입률이 증가할수록 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 낮은 입도의 PCM 분말이 콘크리트의 공극을 채우기 때문인 것으로 판단되며 낮은 공극률은 이온에 의해 발생하는 내구성 손상에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) PCM 캡슐의 혼입량이 높아질수록 콘크리트의 열성능이 높아지는 것은 자명하지만 압축강도 등의 콘크리트의 주요한 물리적 특징은 본 연구에서 수행하지 않았으므로 다양한 측면에서의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며, PCM 캡슐의 효율을 높이기 위해 캡슐 형상에 관한연구, 단가 절감 및 수율 향상을 위한 추가연구가 수행된다면 더욱 빠른 PCM 콘크리트의 일상생활 적용이 가능할 것으로 사료된다.

## References

- [1] Cabeza, L.F., Castellon, C., Nogues, M., Medrano, M., Leppers, R., Zubillaga, O. (2007). "Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings." *Energy and Buildings*, Vol. 39, No. 2, pp. 113-119.
- [2] Cheng, R., Pomianowski, M., Wang, X., Heiselberg, P., Zhang, Y. (2013). "A new method to determine thermophysical properties of PCM-concrete brick." *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 988-998.
- [3] Forty, A. (2013). *Concrete and Culture: A Material History*. Reaktion Books. United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland.
- [4] Meshgin, P., Xi, Y. (2013). "Multi-scale composite models for the effective thermal conductivity of PCM-concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 48, pp. 371-378.
- [5] Shen, Y., Liu, S., Zeng, C., Zhang, Y., Li, Y., Han, X., Yang, L. (2021). "Experimental thermal study of a new PCM-concrete thermal storage block (PCM-CTSB)." *Construction and Building Materials*, Vol. 293, 123540.
- [6] Thiele, A.M., Sant, G., Pilon, L. (2015). "Diurnal thermal analysis of microencapsulated PCM-concrete composite walls." *Energy Conversion and Management*, Vol. 93, pp. 215-227.
- [7] Yang, E.M., Lee, H.R., Cho, C.H. (2016). "Effect of precursor alumina particle size on pore structure and gas permeation properties of tubular  $\alpha$ -alumina support prepared by slip casting process." *Membrane Journal*, Vol. 26, No. 5, pp. 372-380.